Terrasses al·luvials i processos d'incisió durant l'Holocè: caracterització de ventalls al·luvials mitjançant models digitals d'elevacions a partir de dades LIDAR

Francesc POMAR i Laura DEL VALLE

SHNB

SOCIETAT D'HISTÒRIA NATURAL DE LES BALEARS

Pomar, F. i del Valle, L. 2018. Terrasses al·luvials i processos d'incisió durant l'Holocè: caracterització de ventalls al·luvials mitjançant models digitals d'elevacions a partir de dades LIDAR. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears,* 61: 57-77. ISSN 0212-260X. e-ISSN 2444-8192. Palma (Illes Balears).

Els ventalls al·luvials mostren formes a la seva superfície que es poden relacionar amb processos deposicionals, erosius o de meteorització. La literatura especialitzada ha demostrat que la forma de la superfície i la morfometria dels ventalls pot utilitzar-se com un indicador de l'evolució i dels canvis en els processos geomorfològics que els formaren. En aquest estudi es presenta la caracterització morfològica de la superfície de dos ventalls al·luvials, es Caló i es Barrancar, situats a les costes nord-orientals de l'illa de Mallorca. Aquests ventalls tingueren el seu màxim desenvolupament durant períodes de refredament climàtic i nivells marins baixos del Pleistocè Superior a l'Holocè. Actualment, els processos de sedimentació al·luvial són pràcticament inexistents, localment sobre la seva superfície es produeixen processos d'aixaragallament, formació incipient de sòls i hi creix una densa coberta vegetal. A més a més, el canal que els travessa circula encaixat des de l'àpex fins a la costa. Per a la caracterització morfològica s'han utilitzat niguls de punts LIDAR explotats amb eines GIS que han permès construir models digitals d'elevacions d'alta precisió. A partir d'aquests models de la superfície dels ventalls, s'ha pogut identificar la presència de dues terrasses al·luvials adjacents al canal principal i algun paleocanal. Aquestes terrasses representen dos moments d'incisió del canal que poden relacionar-se amb canvis ambientals ocorreguts a l'inici de l'Holocè (9-4 ka), així com també a una disminució en la disponibilitat de sediment i a un progressiu ascens en el nivell de la mar.
Paraules clau: *ventall al·luvial, MDE, LIDAR, processos d'incisió, Holocè; Mallorca.*

ALLUVIAL FAN TERRACES AND HOLOCENE DISSECTION PROCESSES: FAN CHARACTERIZATION USING LIDAR-BASED DEMS. Alluvial fans show different forms that may be related to depositional, erosive or weathering processes. Specialized literature has demonstrated how the fan surface shape and morphometry can be used as an evolution indicator in terms of changes in geomorphological processes that shaped the fans. In this study, we present the morphological characterization of two alluvial fan surfaces (Es Caló and Es Barrancar) located in the Northeastern coasts of Mallorca. These fans reached their maximum development during Late Pleistocene-Holocene climate cooling periods and low sea levels. Currently, alluvial sedimentation processes on Es Caló fan and Es Barrancar fan are scarce, also locally there are gullying processes and incipient soil formation and a dense vegetation cover. The main channel run incised within the alluvial deposits from the apex until the shore. By means of LIDAR point cloud datasets analysis, a morphological fan surface characterization has been performed assisted by GIS tools. This has allowed building high-resolution digital elevation models of each fan. In

this sense, using these fan surface models, presence of two alluvial terraces adjoining the main channel and some paleochannels were identified. These terraces represent two fan dissection events which could be related to environmental changes during the onset of the Holocene (9-4 ka), as well as decreasing sediment supply and rising sea level.
Keywords: *alluvial fan. DEM, LIDAR, dissection processes, Holocene, Mallorca.*

Francesc POMAR i Laura DEL VALLE. Grup de Ciències de la Terra (Geologia i Paleontologia "Guillem Colom"). Dept. de Biologia. Universitat de les Illes Balears. Ctra. de Valldemossa km 7,5, 07122. Palma. E-mails: xiscopomar.geo@gmail.com, lauradelvalle.geo@gmail.com.

Recepció del manuscrit: 8-març-2018; revisió acceptada: 27-juny-2018.

Introducció

Els ventalls al·luvials han estat estudiats des de fa dècades com un dels registres de sediments més importants relacionats amb els climes quaternaris a zones àrides i semiàrides (Blair i McPherson, 2009; Harvey, 2011). Són diversos els processos responsables de la construcció de la forma dels ventalls al·luvials. Per una banda, existeixen processos deposicionals tals com els *debris-flows,* els corrents hiperconcentrats o els corrents laminars (Blikra i Nemec, 1998; Blair, 1999; Harvey *et al*., 2005; Harvey, 2011), en els quals hi juga un paper important en el seu desenvolupament la proporció de la mescla sediment-aigua i, les característiques morfològiques i litològiques de la conca, i per l'altra, els processos erosius responsables de la incisió de canals que també poden dependre de la mescla sediment-aigua però també dels canvis en el nivell de base (i.e. aixecament tectònic i/o eustàcia). La successió dels primers, genera relleus positius com l'apilament de nous lòbuls deposicionals (Miall, 1996; Harvey, 2012; De Haas *et al*., 2016), i per contra, l'activació dels segons generen relleus negatius com terrasses i canals abandonats (Harvey, 2012; Ventra i Nichols, 2013).

En l'estudi dels terrenys quaternaris un dels mètodes preliminars és la generació de cartografies geomorfològiques (Lowe i Walker, 2015). Mitjançant l'ús de fotografies aèries, mapes topogràfics i el treball de camp, és fàcil desxifrar els primers indicis per a entendre quina ha estat la història geològica recent i quins han estat els processos que han predominat. En el cas del ventalls al·luvials, generar mapes de la seva extensió i distribució i situar les formes més destacades és una peça clau per a conèixer l'evolució geomorfològica recent. Una característica que es pot destacar de les superfícies dels ventalls és que es poden ordenar i/o datar segons la seva posició relativa envers el canal actiu, grau d'incisió i patró de la xarxa de drenatge entre d'altres (Wells *et al*., 1987; McFadden *et al*., 1989; Bacon *et al*., 2010; Regmi *et al*., 2014). De la diversitat de mètodes per a caracteritzar i analitzar les formes de la superfície terrestre com l'ús de fotografies aèries o d'imatges satèl·lit, a dia d'avui encara una de les més utilitzades és la generació de mapes geomorfològics assistits per models digitals d'elevacions (MDE) (Morton, 2005; Bacon *et al*., 2010; DiBiase *et al*., 2012; Regmi *et al*., 2014; Lowe i Walker, 2015; Macleod, 2017; Boulton i Stokes, 2018). Recentment, amb l'aparició de nous mètodes remots per obtenir informació de la superfície terrestre s'ha fet un salt qualitatiu i quantitatiu en el tractament i la presentació de les dades. Un

d'aquests mètodes és el LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*), que s'ha col·locat com un dels mètodes més versàtils en treballs de geomorfologia (Leatherman *et al*., 2005; Hilley i Arrowsmith, 2008; Roering, 2008; DiBiase *et al*., 2012; Roering *et al*., 2013).

L'objectiu d'aquest treball és la caracterització morfològica de la superfície de dos ventalls al·luvials (es Caló i es Barrancar) situats al litoral nord-oriental de Mallorca. Per dur-ho a terme s'ha treballat amb capes de niguls de punts LIDAR per a generar MDEs que han permès identificar diverses terrasses sobre els ventalls. Aquests ventalls són uns dels més estudiats en els treballs del Quaternari balear, per la qual cosa disposen de descripcions sedimentològiques detallades i cronologies de les successions estratigràfiques. Aquesta informació estratigràfica i cronològica permet inferir dins el context evolutiu dels ventalls les implicacions de les terrasses al·luvials identificades.

Context geomorfològic de les àrees estudiades

Per a realitzar aquest estudi s'han seleccionat dos ventalls al·luvials costaners, es Caló i es Barrancar, situats al nord-est de l'illa de Mallorca. A continuació es descriuen les característiques i el context geomorfològic de cada ventall.

Es Caló

El ventall al·luvial des Caló està emplaçat al vessant NW de les Serres de Llevant al seu extrem més septentrional (Fig. 1). Se situa al peu del front muntanyós reblint la zona costanera més deprimida de la conca (Fig. 1A). Els materials que la constitueixen majoritàriament són calcàries i dolomies del Juràssic inferior i algunes zones baixes de poca extensió modelades sobre margues del Juràssic Superior i Cretaci (Bourrouilh, 1983). Els materials quaternaris que constitueixen el ventall inclouen diversos tipus de dipòsits típics de ventall com conglomerats i bretxes, a més de dipòsits eòlics (Gómez-Pujol, 1999; Pomar, 2016).

El ventall forma sobre la costa penya-segats verticals tallats per l'erosió marina amb unes alçades que oscil·len entre 4-15 m (Fig. 1A). El tram de costa que ocupa es pot diferenciar en dos sectors condicionats per la geometria i arquitectura del ventall des Caló i separats per un espigó artificial (Fig. 1A). El sector nord destaca per la presència de petits entrants estrets relacionats amb la desembocadura del torrent (Fig. 1A). El sector sud està representat per amplis entrants de forma semi-circular amb plataformes d'abrasió marina a la base dels penya-segats que poden observar-se reblides d'arena o grava formant petites platges. Aquesta forma del perfil costaner ve condicionat per l'erosió diferencial que produeixen els materials del ventall que afloren a la costa amb distintes resistències a l'erosió marina. La conca està constituïda per relleus que no superen els 430 m snm i té una superfície d'1 km^2. La xarxa de drenatge segueix un patró dendriforme, consta de dos tributaris principals que circulen radialment cap a l'àpex del ventall on conflueixen i formen el canal principal (Fig. 1A). La conca té forma en planta circular amb la presència de dolines a la carena sovint capturades per l'erosió remuntant (Fig. 1A). El ventall al·luvial des Caló té una superfície de 0,22 km^2. La seva meitat més meridional està coberta per un dipòsit d'eolianites al qual encara és possible observar-hi formes dunars parabòliques. Segons Pomar (2016), la superfície del ventall té un perfil convex, no supera els 3º d'inclinació mitjana i el radi del ventall és de 0,5 km. El sector de la

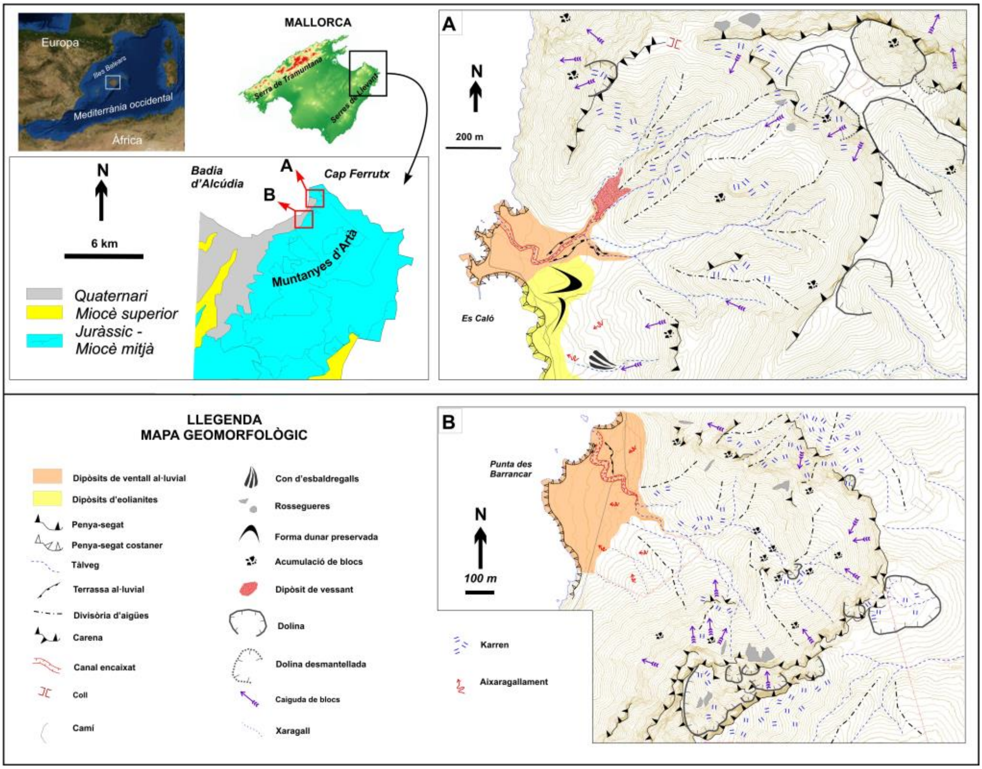


Fig. 1. Mapes geomorfològics dels ventalls al·luvials estudiats i les seves conques: es Caló (A) i es Barrancar (B).

Fig. 1. *Geomorphological maps of the alluvial fans studied and their catchments: es Caló (A) and es Barrancar (B).*

desembocadura presenta un pendent suau cabussant cap al NW amb una pendent mitjana de 3,6º d'inclinació. La resta es disposa cabussant cap a S amb un pendent més elevat de 4,95º d'inclinació. Des de l'àpex el canal principal circula encaixat dins els materials quaternaris del ventall seguint la direcció SW per després formar un meandre amb un gir de 90º i desembocar en direcció NW (Fig. 1A). L'estructura geològica de la conca suggereix que aquests canvis de direcció tan bruscs del canal estan condicionats per tres falles que delimiten la conca de direccions E-W, WSW-ENE, N-S (Bourrouilh, 1983).

Es Barrancar

El ventall al·luvial des Barrancar està situat al vessant NW de les Serres de Llevant a un quilòmetre cap al SW del ventall des Caló (Fig. 1). Ocupa la base del front muntanyós i la part més deprimida de la conca. Els materials que la constitueixen són calcàries i dolomies del Juràssic Inferior que corresponen als cims dels espadats que delimiten la conca i margocalcàries del Cretaci inferior a la

zona central i més deprimida (Bourrouilh, 1983). Els materials quaternaris que constitueixen el ventall estan composts per diversos tipus de depòsits de ventall com conglomerats i bretxes, així com també alguns paleosòls i dipòsits eòlics (Thompson, 2017).

El ventall des Barrancar desenvolupa sobre la costa penya-segats verticals tallats per l'erosió marina que assoleixen unes alçades entre 10-18 m (Fig. 1B). El tram de costa ocupat pel ventall es caracteritza per una meitat nord amb la presència de tres amplis entrants en forma de mitja lluna i ocupats per estretes platges de còdols i graves procedents del desmantellament dels penya-segats. La meitat sud es caracteritza per un penya-segat continu amb una plataforma rocosa estreta a la base coberta per blocs i materials detrítics. Aquesta forma del perfil costaner ve condicionat per l'erosió diferencial que produeixen l'arquitectura i els materials del ventall que afloren a la costa amb distintes resistències a l'erosió marina. La conca està constituïda per relleus que no superen els 540 m snm i té una superfície de 0,72 km^2. La xarxa de drenatge segueix un patró dendriforme, consta de dos tributaris principals que circulen quasi paral·lels i conflueixen a l'àpex del ventall per formar el canal principal. El tributari més llarg té el naixement a la capçalera i recorre tota la línia axial de la conca fins a assolir l'àpex (Fig. 1B). Aquest fet pot estar condicionat per la presència d'una falla de direcció WNW-ESE que divideix la conca per la seva zona central (Bourrouilh, 1983). La conca té forma en planta de circ, amb l'excepció de la presència de dolines a la carena sovint capturades per l'erosió remuntant que li confereixen un contorn lobulat (Fig. 1B). El ventall al·luvial des Barrancar té una superfície de 0,12 km^2. La superfície del ventall té un perfil convex, no supera els 5,5º d'inclinació mitjana i el radi del ventall és de 0,38 km. Des de l'àpex el canal principal circula encaixat dins el materials quaternaris del ventall seguint la direcció NW i formant sis meandres de gir molt tancat (Fig. 1B).

Materials i mètodes

Per a la caracterització morfològica del ventall al·luvial des Caló i des Barrancar s'ha treballat en dos sentits, d'una banda la identificació dels principals trets geomorfològics de la zona assistit per la interpretació d'ortofotografia aèria i per l'altra, la generació de models digitals d'elevacions (MDE) de la superfície dels ventalls. L'ortofotografia utilitzada ha estat la de l'any 2015 proporcionada per SITIBSA mitjançant el seu servidor (WMS). En aquest sentit, la utilització de la ortofotografia combinat amb campanyes de camp ha permès la descripció dels principals trets geomorfològics dels ventalls i les seves conques (Fig.1).

Per a la generació de models digitals d'elevacions de la superfície dels ventalls s'han utilitzat les capes de niguls de punts LIDAR que proporciona en format lliure el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG). S'han descarregat les capes PNOA_2014_BAL_526-4400_ORT-CLA-RGB, PNOA_2014_BAL_526-4402_ORT-CLA-RGB, PNOA_2014_BAL_528-4400_ORT-CLA-RGB, PNOA_2014_BAL_528-4402_ORT-CLA-RGB i PNOA_2014_BAL_528-4404_ORT-CLA-RGB corresponents al vol de l'any 2014 sobre l'extrem nord de les Muntanyes d'Artà (Mallorca). Cada capa correspon a una cobertura de superfície de 2x2 km. Els niguls de punts han estat capturats pel sensor amb una densitat de 0,5 punts/m^2 i georeferenciats en base al datum ETRS89. Els punts duen informació

associada de localització (coordenades x, y) i elevació (z) i a més, es classifiquen segons si el sensor ha rebut el retorn per part del terreny, la vegetació, la mar i edificacions. Per a l'explotació de les capes LIDAR i la posterior producció d'informació topogràfica s'ha utilitzat el programari lliure QGIS versió 2.18.13. La utilització de les capes de punts amb tota la informació associada genera models digitals del terreny (MDT) en els quals s'hi inclou la vegetació i les edificacions. Aquest fet pot distorsionar la informació topogràfica de les superfícies dels ventalls ja que la presència de boscs pot emmascarar la forma del ventall. Per això, s'han reclassificat els punts utilitzant els algoritmes LAStools que permeten editar i generar nova informació de les capes de punts. Això permet generar una capa de punts amb únicament dues categories: superfície del terreny i la resta. L'algoritme "last2dem" realitza una interpolació TIN a partir dels punts classificats com a terreny i finalment obté el MDE, del qual s'ha extret les corbes de nivell amb una equidistància de 1 m.

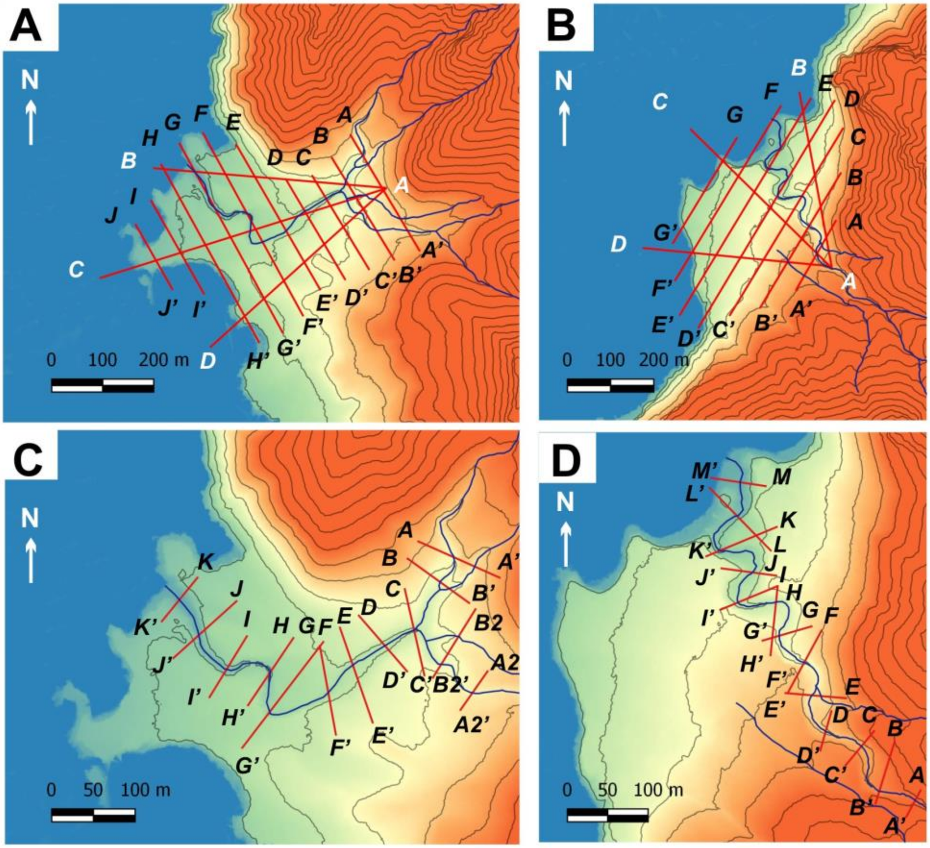


Fig. 2. Posició dels transsectes realitzats sobre el ventalls per obtenir els perfils topogràfics. A i B: transsectes radials i tranversals. C i D: Transsectes tranversals sobre el recorregut del canal principal.
Fig. 2. *Position of the topographic profiles performed on the fans. A and B: Radial and transverse profiles. C and D: Transverse profiles on the main channel path.*

A més a més, amb el complement "Qgis2threejs" del QGIS s'han realitzat MDEs en 3D de les zones dels ventalls amb formes més significatives.

Per a la caracterització i identificació de la forma de la superfície dels ventalls s'han realitzat perfils topogràfics a través de transsectes radials i transversals seguint el mètode utilitzat per Macleod (2017). Els perfils topogràfics basats en els MDE s'han generat mitjançant el complement "Profile tool" del QGIS. Per cada ventall s'han realitzat tres transsectes radials des de l'àpex fins a la costa. Pel que fa als transsectes transversals, se n'han realitzat 10 as Caló i 7 as Barrancar amb una separació de 50 m (Fig. 2). Addicionalment, s'han realitzat transsectes transversals de detall al llarg del canal principal dels ventalls. S'obtingueren 13 transsectes pels dos ventalls amb una separació de 50 m de recorregut del canal des de l'àpex fins a la desembocadura.

Resultats

Els ventalls al·luvials estudiats presenten la típica forma de gran lòbul convex que sobresurt des de la desembocadura del barranc i va descendint progressivament cap a la costa. També mostren un perfil tallat abruptament al contacte amb la mar que forma penya-segats continus constituïts pels materials al·luvials. Les observacions geomorfològiques i l'anàlisi topogràfic mitjançant models digitals d'elevacions d'alta resolució (Fig. 3A,C) i models 3D (Fig. 3B,D) han identificat fins a dues terrasses al·luvials adjacents als meandres del canal principal sobre la zona mitjana-distal dels ventalls (Fig. 3A,C). A continuació, es fa una descripció de les formes identificades a la superfície de cada ventall amb l'anàlisi dels perfils topogràfics generats a partir dels MDE. Primer de tot, es fa un visió general de la forma del ventall seguint transsectes radials i transversals, i a continuació es passa a l'anàlisi de perfils del canal en detall.

Caracterització de la superfície del ventall des Caló

El ventall des Caló mostra als transsectes radials una superfície pràcticament uniforme des de l'àpex fins a la costa, només s'observen algunes petites incisions a la zona mitjana que representen els meandres del canal. Al transsecte A-D (Fig. 4) s'hi poden observar dues protuberàncies còncaves que coincideixen amb dos fronts de dunes fòssils identificades en aquest sector del ventall (Pomar, 2016). Per altra banda, els transsectes tranversals mostren com l'àpex del ventall el constitueixen la unió de dos tributaris (Fig. 4, A-A' i B-B') que passen a formar un únic canal encaixat en forma de "V"(Fig. 4, C-C'). Al perfil D-D' es veu com aigües avall la forma del canal es modifica apareixent a un dels flancs dues petites inflexions que canvien la inclinació de la paret del canal. A partir del perfil D-D' i fins el perfil F-F', es poden identificar sobre la superfície del ventall diverses incisions que corresponen als meandres que van canviant de direcció sobre la zona mitjana del ventall. A més a més, també s'observen algunes superfícies subhoritzontals unides als canals que es situen en alçades diferents. Aquestes superfícies s'interpreten com a terrasses al·luvials. Cal destacar que tots el transsectes transversals mostren uns perfils basculats suaument vers el NW (Fig. 4, A-A' fins J-J') seguint a grans trets la circulació preferent del canal principal.

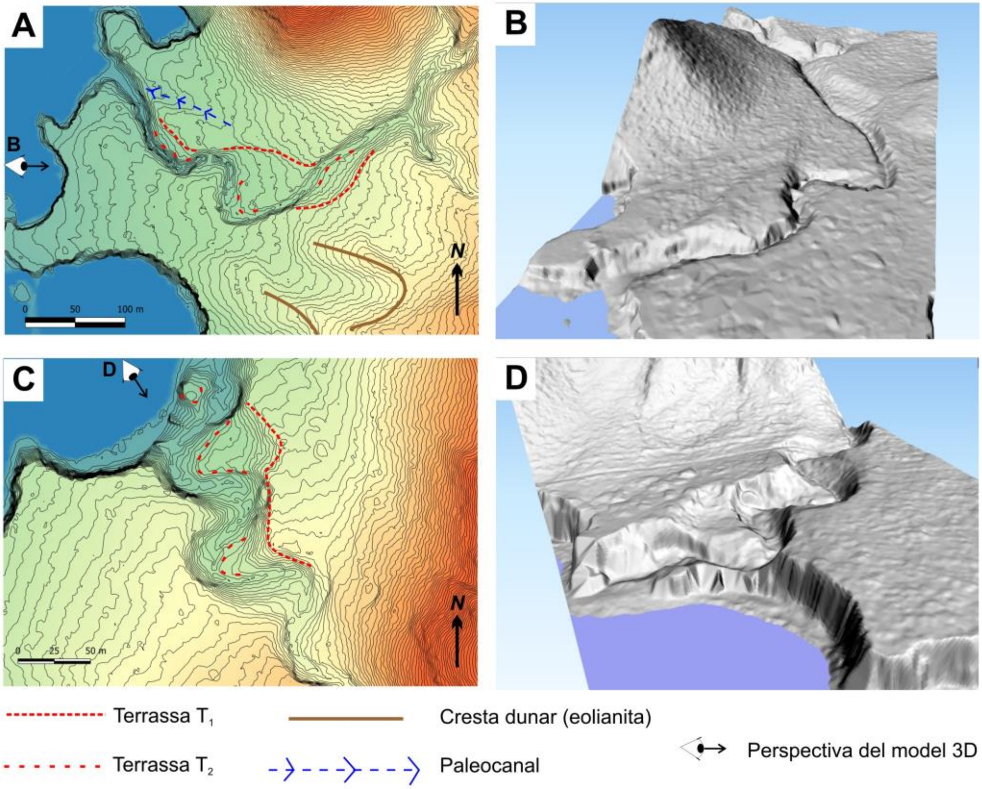


Fig. 3. Mapes topogràfics i MDEs d'ombres obtinguts a partir de les capes de punts LIDAR de cada ventall. S'hi representen les principals formes identificades sobre la superfície. L'equidistància entre les corbes de nivell és de 1 m. A i B: Ventall des Caló. C i D: Ventall des Barrancar.

Fig. 3. *LIDAR-based topographic maps and hillshade DEMs of each fan. Main forms identified on the fan surface are represented. Contour lines 1 m. A and B: Es Caló fan. C and D: Es Barrancar fan.*

Disposició i forma de les terrasses

Els transsectes transversals al llarg de tot el canal permeten tenir un visió de detall de la disposició, forma i relació que tenen les terrasses al·luvials respecte del canal (veure Fig. 2 per a la localització dels transsectes, Fig. 5). Entre els perfils A-A', B-B' i A2-A2', B2-B2', s'observa la forma de la desembocadura dels tributaris que s'uniran per a formar el canal principal a l'àpex. Les incisions que s'observen al flanc del canal són xaragalls que renten la base del vessant nord de la conca i que circulen en aquest punt quasi paral·lels al canal. Aquests xaragalls tenen la suficient energia com per erosionar tímidament la superfície del ventall i assolir el canal principal. A partir del perfil C-C', s'inicia el recorregut del canal principal a l'àpex. Presenta un forma clara de "V" que sembla anar eixamplant-se a l'eix central aigües avall (Fig. 5, D-D'). Des del perfil E-E' fins al perfil I-I' es mostren les formes del canal a la zona mitjana del ventall. Aquesta zona

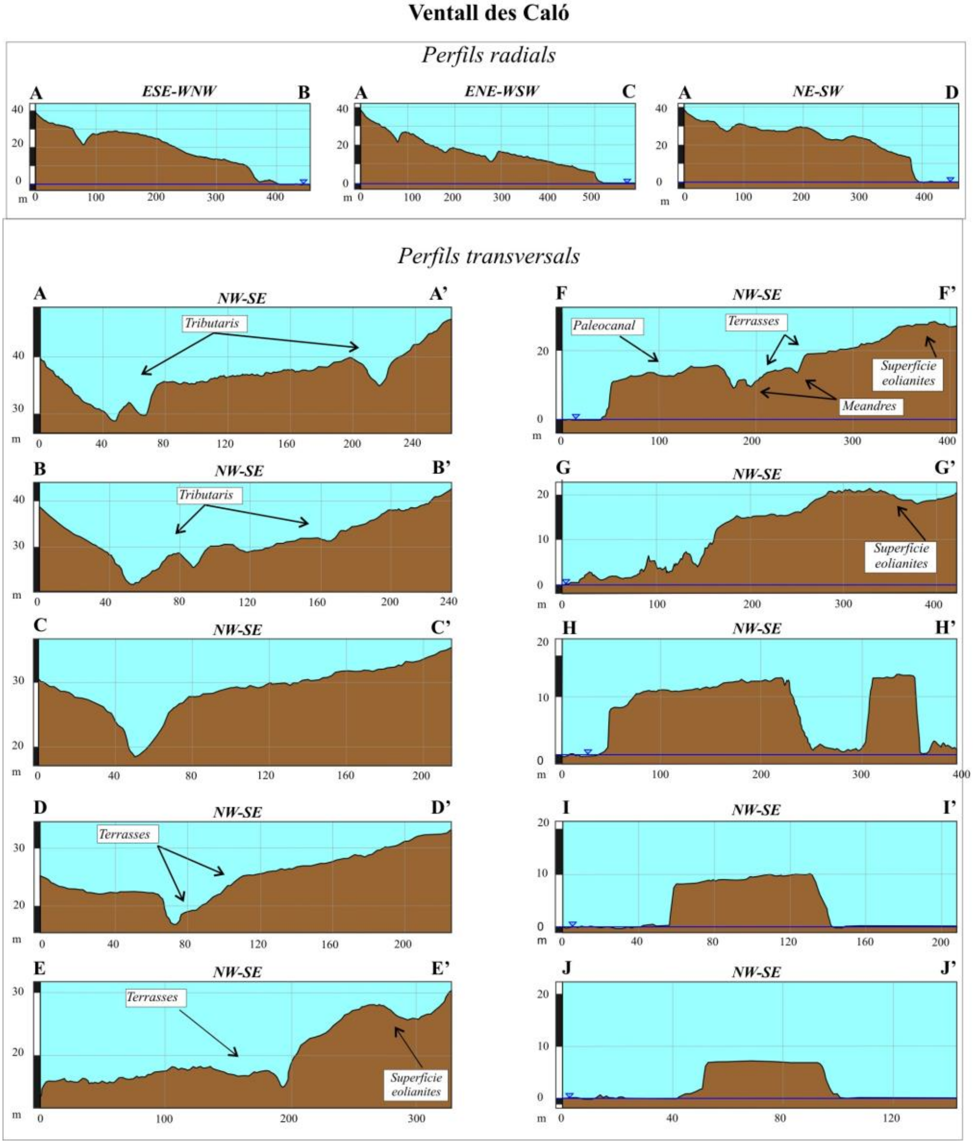


Fig. 4. Perfils radials i transversals de la superfície del ventall des Caló. Consultar Fig. 2A per a la localització dels perfils.
Fig. 4. *Radial and transverse profiles of Es Caló fan surface. See Fig. 2A for profile location.*

es caracteritza per mostrar quatre meandres ben definits (Fig. 3A i B). Al perfil E-E' s'observa com a la part interior del meandre es defineixen dues terrasses (T_1 i T_2). La primera (T_1) es situa a uns 8 m per damunt e l canal generant una forma d'escaló suau

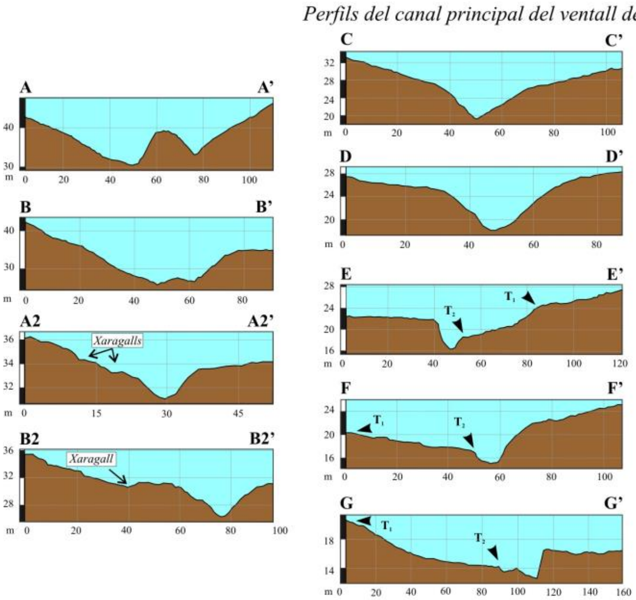


Fig. 5. Perfils tranversals del canal principal del ventall des Caló. Les etiquetes T_1 i T_2 assenyalen les terrasses al·luvials. Consultar Fig. 2C per a la localització dels perfils.
Fig. 5. *Transverse profiles of the main channel of Es Caló fan.* T_1 *and* T_2 *labels point the alluvial fan terraces. See Fig. 2C for profile location.*

que deixa pas a una superfície plana i suaument inclinada d'uns 30 m d'ample que conforma la segona terrassa (T_2) sobre el canal. Al perfil F-F' un nou meandre de gir invers a l'anterior deixa veure a la seva part interior una superfície més o manco plana d'uns 40 m d'ample que forma un escaló ben definit a l'interior del canal i que és la terrassa T_2. En aquest punt la terrassa T_1 pràcticament no es pot identificar degut a que només forma una lleu inflexió a uns 4 m d'alçada sobre el canal. Entre els perfils G-G' i H-H', les dues terrasses es defineixen clarament a la part interior dels meandres. Al perfil G-G' es produeix la mateixa disposició de formes que en els anteriors perfils consistents en un primer escaló sobre la superfície del ventall (T_1) a uns 7 m d'alçada sobre el canal que progressivament dóna pas a una superfície plana de poca inclinació i que finalment acaba amb un nou escaló (T_2) just sobre el canal. En aquesta zona els meandres tenen un gir molt ampli (Fig. 3A) i això genera que la distància entre les terrasses sigui de les més elevades i assoleixi fins a 70 m d'ample. Entre els perfils I-I' i K-K' s'observa la forma del canal en el tram de la desembocadura. Aquí torna a mostrar la mateixa forma de "V" que al seu tram superior a l'àpex, però a la desembocadura (Fig. 5, K-K') aquesta forma es suavitza cap a una forma de "U". Destaca la lleu depressió que s'observa al costat del canal (Fig. 5, J-J') que es tracta d'un tram antic del canal que circulava quasi paral·lel a l'actual (Fig. 3A).

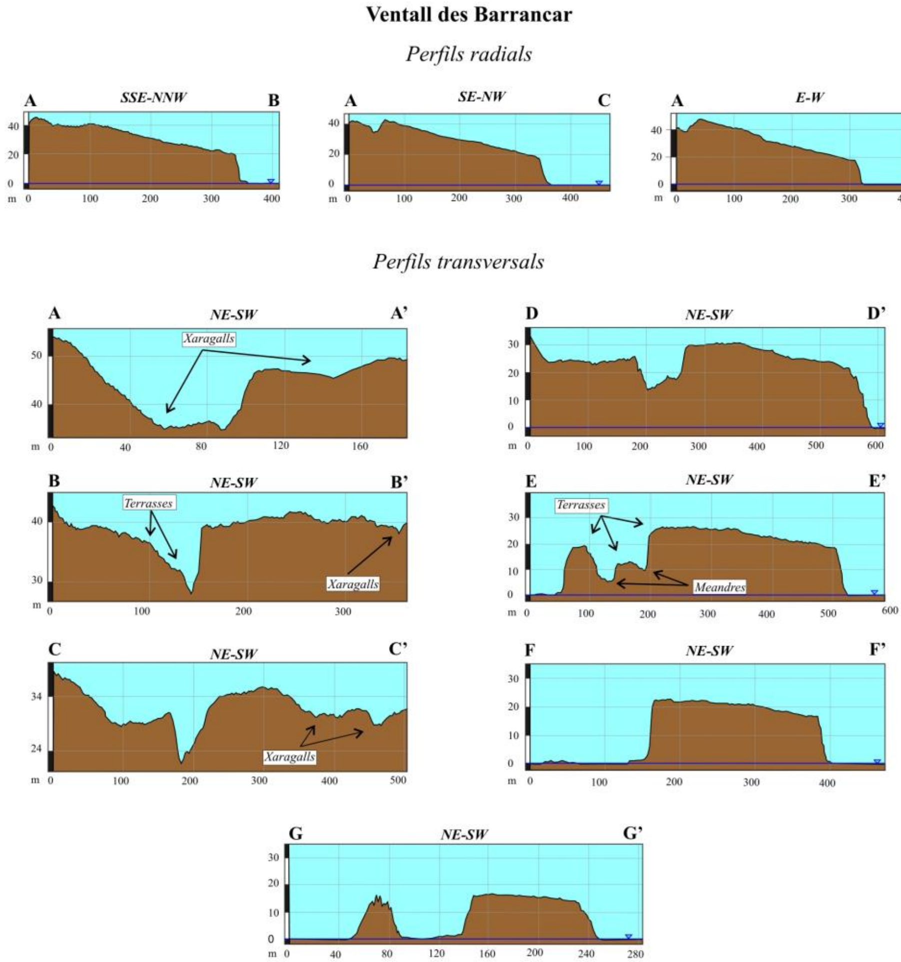


Fig. 6. Perfils radials i transversals de la superfície del ventall des Barrancar. Consultar Fig. 2B per a la localització dels perfils.
Fig. 6. *Radial and transverse profiles of Es Barrancar fan surface. See Fig. 2B for profile location.*

Caracterització de la superfície del ventall des Barrancar

El ventall des Barrancar mostra als transsectes radials un perfil pràcticament pla i inclinat que acaba abruptament amb un penya-segat vertical sobre la costa (Fig. 6, A-B, A-D, A-C). Aquesta forma de gran tascó a la base del front muntanyós és típica de ventalls al·luvials caracteritzats per l'apilament de cossos sedimentaris. Pel que fa als transsectes transversals, es caracteritzen per definir un perfil en el que hi destaca la presència d'un canal central fortament encaixat dins la superfície del ventall (Fig. 6, A-A' fins D-D'). Per altra banda, als perfils A-A', B-B' i C-C' s'hi observen certes incisions paral·leles al canal principal generades per xaragalls que

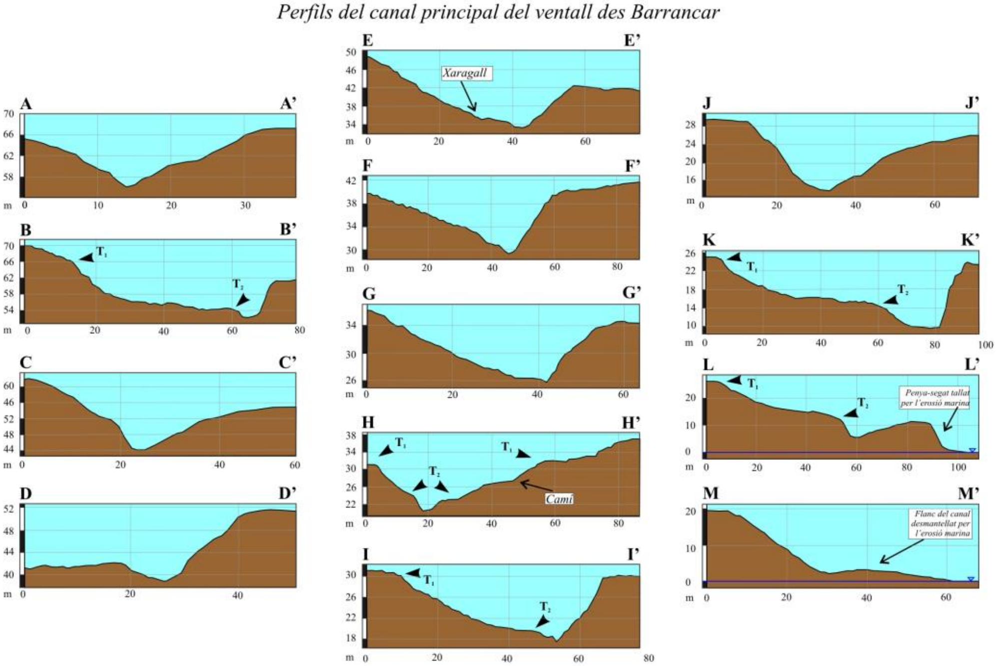


Fig. 7. Perfils tranversals del canal principal del ventall des Barrancar. Les etiquetes T_1 i T_2 assenyalen les terrasses al·luvials. Consultar Fig. 2D per la localització dels perfils.
Fig. 7. *Transverse profiles of the main channel of Es Barrancar fan.* T_1 *and* T_2 *labels point the alluvial fan terraces. See Fig. 2D for profile location.*

renten la base dels vessants de la conca i s'endinsen una desena de metres sobre la superfície del ventall. El canal mostra una forma de "V" lleugerament esbiaixada degut a la presència de dues petites inflexions en el perfil d'un dels flancs que s'interpreten com a terrasses al·luvials (Fig. 6, B-B'). Al perfil E-E' s'identifiquen dues incisions i algunes superfícies unides al canal principal amb diverses alçades que s'interpreten com a meandres i terrasses al·luvials. A més a més, entre el perfil E-E' i G-G' s'observa la forma convexa característica dels ventalls al·luvials així com els penya-segats verticals tallats per l'erosió de l'onatge a les parts distals.

Disposició i forma de les terrasses

Els transsectes tranversals al llarg de tot el canal principal han permès definir i descriure en detall les terrasses al·luvials que els models digitals d'elevacions de la superfície del ventall ja deixaven entreveure (veure Fig. 2 per a la localització dels transsectes, Fig. 7). El ventall des Barrancar mostra a l'àpex la formació d'un únic canal encaixat, ja que la unió dels tributaris es produeix just per damunt de l'espai ocupat pel ventall (Fig. 1B). Al llarg de tot el canal, els perfils van mostrant una forma de "V" oberta amb l'eix central lleugerament desplaçat segons el gir del meandre (Fig. 7, A-A', C-C', D-D', E-E', F-F' i G-G'). Això fa que els flancs del canal manco inclinats corresponguin a la

part interior dels meandres. De fet, en aquesta part és on destaca la formació de dues terrasses (T_1 i T_2) que es poden seguir de manera més o manco contínua des de l'àpex (Fig. 7, B-B') fins a la zona mitjana-distal (Fig. 7, L-L'). El perfil B-B' és la zona més proximal del ventall on ja s'hi defineixen dues terrasses. En aquesta zona, la primera terrassa (T_1) forma un escaló arrodonit a uns 16 m sobre el canal que a continuació dóna pas a una superfície lleugerament còncava i inclinada d'uns 20 m d'amplada que formarà un nou escaló de 2 m sobre el canal (T_2). Al tram comprès entre les perfils C-C' i G-G', no s'aprecien indicis clars de la presència de terrasses. Per altra banda, a partir de la zona mitjana del ventall (Fig. 7, H-H') els perfils mostren quasi contínuament unes superfícies planes i inclinades a diferents alçades als flancs del canal. El perfil H-H' és l'únic punt on s'observa la presència de les dues terrasses a banda i banda del canal. La terrassa T_1 es situa a uns 10 m sobre el canal, seguidament al flanc interior del meandre forma un superfície contínua i inclinada que només es veu interrompuda per la presència d'un camí i a continuació apareix un nou escaló d'uns 3 m que dóna pas al canal. Al flanc exterior del meandre la terrassa T_1 es situa a uns 9 m sobre el canal formant un escaló quasi en angle recte, a continuació una superfície recta i inclinada d'uns 10 m d'ample i finalment es forma un petit escaló en angle recte a uns 4 m sobre el canal. Entre els perfils I-I' i L-L' és on les terrasses mostren major desenvolupament. La terrassa T_1 assoleix entre 10 i 15 m d'alçada sobre el canal formant un gran escaló que dóna pas a una àmplia superfície còncava que canvia cap a plana i subhoritzontal. En planta abasta una zona de 20 a 25 m d'ample en forma de lòbul allargat a l'interior dels meandres (Fig. 3C). A continuació aquesta superfície es veu tallada per un escaló en general de forma arrodonida que es situa sobre el canal entre 4-8 m d'alçada (T_2). Al perfil de la desembocadura (Fig. 7, M-M') la forma del canal queda desdibuixada per l'erosió de l'onatge que ha desmantellat un dels flancs.

Discussió

Processos d'incisió i disponibilitat de sediment en ambients al·luvials

Les formes més rellevants de la superfície dels ventalls estudiats que s'han identificat mitjançant els MDEs estan relacionades amb el canal principal. Es tracta de terrasses al·luvials i algun canal abandonat que es poden atribuir a dos estadis d'incisió del canal principal. A més a més, hi ha la presència de diversos xaragalls que renten la superfície més proximal i no arriben a assolir la costa. La formació de canals encaixats sobre els ventalls al·luvials pot respondre a factors com canvis en el nivell de base o en la disponibilitat de sediment, els quals poden desencadenar processos erosius responsables d'aquestes formes. Segons Harvey (2011), els ventalls al·luvials poden passar d'un estat d'agradació a un estat d'incisió (*dissection*) pels canvis en el nivell de base. Aquests canvis es produeixen per aixecament tectònic o bé per canvis en el nivell de la mar o d'un llac. Cal dir que Mallorca representa una àrea relativament estable amb una activitat tectònica baixa sobretot a partir del Pliocè (Fornós *et al*., 2002; Giménez, 2003; Silva *et al*., 2005) cosa que fa que els canvis geomorfològics produïts als ventalls es focalitzin exclusivament als canvis en el nivell de base relacionats amb les fluctuacions eustàtiques. En aquest sentit, un descens en el nivell de base pot repercutir als ventalls provocant processos

erosius intensos sobre la seva superfície que desencadenin l'encaixament dels canals. Per altra banda, un ascens del nivell de base afavoreix els processos deposicionals i per tant, l'agradació dels ventalls. Això no obstant, se sap que un ascens en el nivell de base, en aquest cas del nivell de la mar, pot ser responsable de processos d'incisió dels canals. A ventalls costaners de la Mediterrània occidental, l'ascens del nivell de la mar durant el darrer període interglacial i els inicis de l'Holocè provocà la incisió dels canals sobre els ventalls degut a l'erosió de la zona distal (Harvey *et al*., 1999). L'erosió marina al peu dels ventalls al·luvials activa la incisió dels canals cap la zona distal, però aquesta incisió es pot anar propagant cap a la zona mitjana i assolir la zona proximal si l'erosió distal s'intensifica o si es produeix un augment del cabal d'aigua que alimenta el ventall (Harvey *et al*. 1999; Blair i McPherson, 2009; Harvey, 2011). D'aquesta manera a més dels canvis en el nivell de base, la quantitat d'aigua que arriba al ventall condiciona el predomini de processos deposicionals o erosius. Això fa que ventalls on hi predominen els processos deposicionals la proporció aigua/sediment sigui baixa afavorit per una disponibilitat de sediment alta i per contra, a ventalls on hi predominen els processos erosius la proporció aigua/sediment sigui alta afavorit per una disponibilitat de sediment baixa (Miall, 1996; Harvey, 2011). Així les coses, els ventalls amb una major disponibilitat de sediment tendiran a l'agradació i fins i tot progradació i els ventalls amb menor disponibilitat de sediment tendiran a encaixar els canals dins la seva superfície. En aquest sentit, un dels principals factors que poden modificar i/o intensificar aquests processos és el clima (Blair i McPherson, 2009). La successió de períodes més càlids i humits afavoreixen una major cobertora vegetal que reté sediment però també afavoreix una major quantitat de cabal que alimenta els ventalls. Per altra banda, els períodes més àrids i frescs afavoreixen una menor quantitat de cabal però el desenvolupament d'una vegetació més dispersa deixa exposat major quantitat de sediment (Miall, 1996). A treballs recents que tracten sobre l'evolució geomorfològica de ventalls al·luvials a la Mediterrània ja apunten cap un control climàtic en el desenvolupament de ventalls sobretot durant períodes freds i àrids (Macklin *et al*., 2002). Per altra banda, les regressions marines faciliten la creació del suficient espai a les costes per a que els ventalls progradin cap a la plataforma continental (Andreucci *et al*., 2014; Pomar *et al*., 2018). A més a més, també cal destacar que els moments de refredament poden desencadenar períodes tempestuosos amb intenses precipitacions (Moreno *et al*., 2002; Kaspar *et al*., 2007) capaces de generar importants revingudes.

Implicacions de les terrasses al·luvials per a l'evolució recent dels ventalls des Caló i es Barrancar

Les dues terrasses identificades es poden atribuir a dos moments diferents d'incisió del canal principal dels ventalls. Cronològicament, aquests moments es situarien cap al final del desenvolupament màxim dels ventalls. Segons Pomar (2016) i Thompson (2017), el desenvolupament dels ventalls des Caló i des Barrancar s'inicià cap a finals del MIS 5 quan després del darrer període interglacial comencen a establir-se unes condicions climàtiques més fredes i àrides i importants moments de regressió marina (Fig. 8A,B). Durant aquest període la successió de fluctuacions climàtiques més fredes i relativament més càlides afavoreixen la formació de dipòsits de corrents laminars, *debris-flow*, canals,

eolianites i paleosòls que caracteritzen les successions estratigràfiques dels ventalls (Fig. 8A). Cap a finals del Pleistocè superior (~14 ka) les condicions ambientals comencen a canviar de nou (Fig. 8B), establint-se un ràpid escalfament del clima i un progressiu ascens del nivell marí (Shakun *et al*., 2012; Vacchi *et al*., 2016).

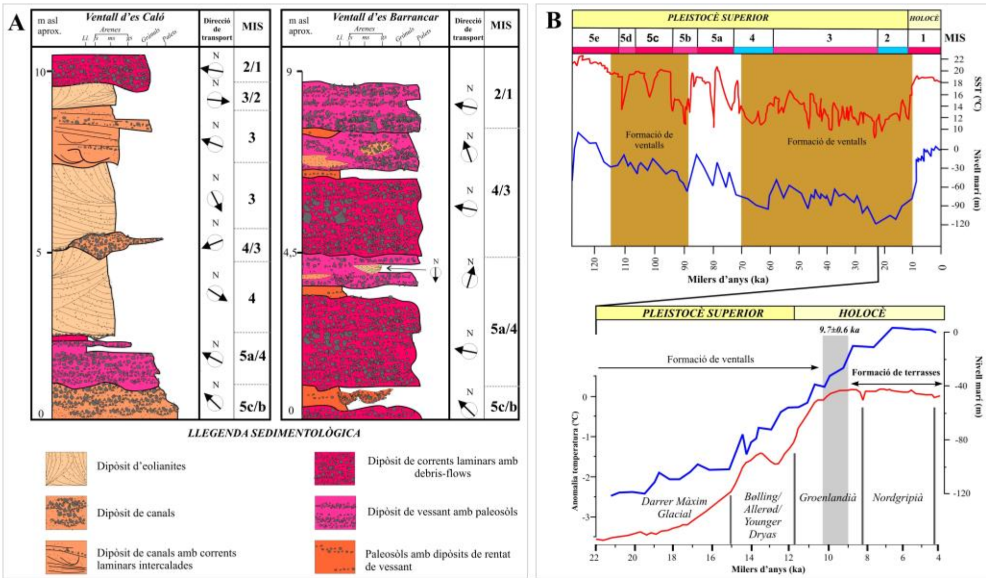


Fig. 8. Estratigrafia i cronologia de les seqüències dels ventalls des Caló i es Barrancar. A: Columnes estratigràfiques sintètiques des Caló (esquerra) i es Barrancar (dreta). Els estadis isotòpics (MIS) als dipòsits des Barrancar s'han inferit a partir de dades de Thompson (2017). B: Corba climàtica de temperatura superficial de la mar i corba eustàtica pels darrers 125 ka (superior). SST=temperatura mitjana de la superfície de la mar (Martrat *et al.*, 2004), MIS=cronologia dels estadis isotòpics (Martrat *et al.*, 2004), nivell marí modificat de Siddall et al. (2003). Períodes de formació de ventalls inferits a partir de dades de Pomar (2016) i Thompson (2017). Corba eustàtica i corba climàtica de temperatura pels darrers 22 ka (inferior). La franja vertical grisa assenyala el darrer període de sedimentació al·luvial descrit per Thompson (2017). Corbes modificades de Shakun *et al.* (2012), cronologia del darrer màxim glacial i dels episodis *Bølling/Allerød/Younger Dryas* inferit a partir de dades de Lowe i Walker (2015), cronologia dels estatges de l'Holocè inferit a partir de dades de IUGS (2018).

Fig. 8. *Stratigraphy and chronology of Es Caló fan and Es Barrancar fan successions. A: Synthetic stratigraphic logs of Es Caló (left) and es Barrancar (right). Isotopic stages (MIS) of es Barrancar deposits were inferred from Thompson (2017). B: Climatic curve of sea surface temperature and eustatic curve for the last 125 ka (upper graph). SST=sea surface temperature (Martrat et al. (2004), MIS=chronology of the marine isotopic stages (Martrat et al. (2004), sea level modified from Siddall et al. (2003). Periods of fan aggradation inferred from Pomar (2016) and Thompson (2017). Eustatic curve and climatic curve of temperatures for the last 22 ka (lower graph). Grey vertical strip points the last alluvial sedimentation period described by Thompson (2017). Curves modified from Shakun et al. (2012), Last Glacial Maximum and Bølling/Allerød/Younger Dryas chronologies inferred from Lowe and Walker (2015), Holocene stages chronology inferred from IUGS (2018).*

Tot i així, en els mil·lennis següents encara es produeixen fluctuacions fredes (*Bølling/Allerød/Younger Dryas*) que afavoreixen la formació de dipòsits de ventall al·luvial, arribant al darrer i més recent estadi de desenvolupament dels ventalls cap als 9,7 ka (Thompson, 2017). Amb tota aquesta informació sembla que els processos de sedimentació i agradació dels ventalls foren actius fins fa uns 10 ka. En aquest moment el clima estava assolint unes temperatures semblants a les actuals (Shakun *et al*., 2012) i la mar ascendia en petites pulsacions condicionades pel desgel dels casquets polars (Törnqvist i Hijma, 2012, Rovere *et al*., 2018), malgrat que aleshores encara es situava a cotes de -20 m (Fig.8B). La formació de les terrasses sobre els ventalls des Caló i des Barrancar degué iniciar-se cap la meitat del primer estatge de l'Holocè, el Groenlandià fa uns 9 ka (Fig. 8B). En aquest moment es produí un ràpid ascens de les temperatures amb algun petit refredament relatiu, com el registrat a 9,3 ka (Lowe i Walker, 2015), que degué afavorir la deposició dels darrers dipòsits que cobriren la superfície dels ventalls. A més a més, la ràpida transgressió marina (Smith *et al*., 2011) degué inundar gran part de la plataforma continental del nord de Mallorca suggerint que la costa es situava a uns -20 m per davall el nivell actual. Aquest context desencadenaria l'erosió marina de la part més distal dels ventalls ja que Pomar (2016) indica que era possible que el ventall des Caló s'estengués fins a mig quilòmetre cap a l'interior de la badia d'Alcúdia, distància a la qual se situa si fa no fa la cota batimètrica -20 m (IEO-IHM, 2001). En aquest sentit, l'erosió de la zona distal iniciava la incisió dels canals just al marge dels ventalls i a mesura que la transgressió continuava la incisió s'intensificava i es propagava cap a la zona mitjana dels ventalls. És en aquest moment que la superfície dels ventalls passa a quedar com una superfície abandonada que acabà formant la terrassa T_1. A partir d'aquest moment les aigües d'escorrentia que arribin de la conca es concentraran per circular per dins el nou canal encaixat. A més a més, durant aquest període a les Illes Balears ja s'establia un ambient més humit que afavoria el creixement de vegetació (Burjachs *et al*., 1994; Yll *et al*., 1997). Al final del Groenlandià es produí un refredament abrupte del clima que durà uns centenars d'anys (Törnqvist *et al*., 2004; Frigola *et al*., 2007; Lowe i Walker, 2015) i que es registra a 8,2 ka (Fig. 8B). Aquest refredament sembla que es traduí en una estabilització del nivell marí (Vacchi *et al*., 2016) que degué reduir l'erosió als marges dels ventalls però pogué afavorir les condicions meteorològiques necessàries per provocar tempestes amb fortes precipitacions. Aquest fet suggereix que una major quantitat d'aigües d'escorrentia circulant sobre els ventalls podria haver estat la responsable d'una major incisió del canal principal generant el desplaçament lateral de meandres. Aquest desplaçament podria estar relacionat amb l'arquitectura de les fàcies dels nivells més superficials dels ventalls. Els escalons de la terrassa T_1 i la terrassa T_2 estan modelats sobre conglomerats i bretxes clast-suportades, mentre que la superfície que les separa i el canal actual pot coincidir amb l'aflorament de nivells de gresos en el cas des Caló i de paleosòls o nivells de bretxes suportades per la matriu en el cas des Barrancar (Fig. 9B). Per tant, tot això suggereix un possible control de la distribució espacial de les fàcies dels sediments que constitueixen els ventalls a l'hora de desenvolupar-se els processos d'incisió i formació de meandres. Al final del refredament a 8,2 ka s'inicia

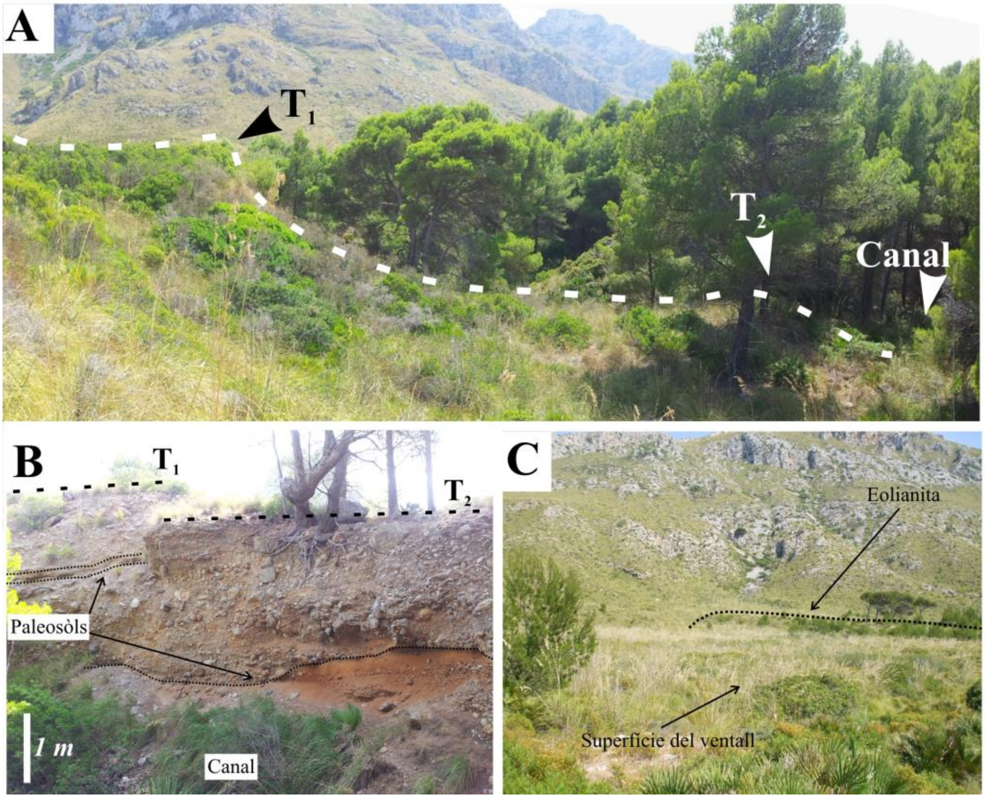


Fig. 9. A: Vista panoràmica de les terrasses al·luvials a l'interior d'un meandre del ventall des Barrancar. B: Secció dels dipòsits de ventall al·luvial constituïts per bretxes i paleosòls exposats al marge del canal encaixat. S'hi observa la presència d'un paleosòl a nivell de la terrassa T_2, així com també al flanc del canal actual. C: Vista panoràmica de la superfície de la meitat sud del ventall des Caló on s'hi observa un monticle atribuït a una forma dunar fòssil.
***Fig. 9.** A: Panoramic view of alluvial fan terraces on the inner part of a meander at Es Barrancar fan. B: Alluvial fan deposits section consisting of breccias and paleosols exposed in the flank of an incised channel. Presence of a paleosol at the same level of terrace T_2 is observed, as well as in the present channel flank. C: Panoramic view of the Southern half of Es Caló fan where a smooth ridge ascribed to a fossil dune is observed.*

l'estatge Nordgripià en el qual es tornaren a recuperar les temperatures i seguiren augmentant lleugerament assolint registres molt semblants a l'actualitat (Frígola *et al.*, 2007). L'ascens del nivell marí també es va reactivar arribant ja a cotes per damunt dels -10 m (Fig. 8B) i intensificant l'erosió costanera que ja devia haver desmantellat pràcticament tota la zona distal dels ventalls. Tot plegat degué iniciar novament la incisió del canal abandonant les superfícies aplanades que s'observen a l'interior dels meandres (Fig. 5 G-G', 7 K-K' i 9A). Aquest nou episodi d'incisió

degué ser el responsable del desenvolupament de la terrassa T_2 a mesura que el canal actual es formava. El final de l'estatge Nordgripià ve marcat per un nou moment de refredament i aridificació abrupte del clima (Fig. 8B) situat a 4,2 ka (Frigola *et al.*, 2007; Lowe i Walker, 2015). Aquest episodi no fou tan intens com l'anterior i amb prou feines va durar 200 anys, cosa que probablement no fos suficient per iniciar un nou episodi d'incisió. En aquest sentit, el nivell marí se situava a només 1 m per davall el nivell actual i se considera que fou una època bastant àrida i de poques precipitacions (Yll *et al.*, 1997; Fornós *et al.*, 2007; Fornós *et al.*, 2012). A partir d'aquest moment la superfície dels ventalls degueren sofrir pocs canvis en quant a la formació de noves terrasses, però sí que es degué començar a establir la densa vegetació arbustiva que veiem avui dia (Burjachs *et al.*, 1994; Yll *et al.*, 1997) i que emmascara formes relictes com les terrasses o antigues dunes que cobrien els ventalls (Fig. 9A i C). Amb tot, si tenim en compte l'evolució geomorfològica descrita anteriorment dels ventalls des Caló i des Barrancar, es pot entendre que han entrat en un estadi de desmantellament des de fa 9 ka. Les aigües d'escorrentia quasi no transporten sediments i això les converteix en més agressives quan circulen sobre el ventall, arrabassant els sediments dipositats amb anterioritat. A més a més, l'ascens continuat del nivell de mar progressivament ha erosionat els marges dels ventalls i ha fet retrocedir la línia de costa fins al punt que molt possiblement més de la meitat de cada ventall ha estat desmantellat i els sediments reciclats per les corrents marines i depositats en forma de platges de còdols.

Conclusions

La caracterització de la superfície de ventalls mitjançant MDEs a partir de dades LIDAR ha permès per primera vegada identificar la forma i disposició de terrasses sobre ventalls al·luvials de Mallorca. S'han descrit fins a dues terrasses situades sobre la zona proximal i mitjana dels ventalls des Caló i des Barrancar relacionades amb els flancs del canal encaixat que travessa els ventalls. Les terrasses es disposen generalment sobre la part interior dels meandres, generant àmplies superfícies aplanades a diferents alçades entre el llit del canal i la superfície del ventall. Alguns estudis recents sobre els ventalls estudiats han pogut establir uns marcs cronològics precisos de la seva formació que han facilitat entendre les implicacions de les terrasses en quant a canvis en els processos geomorfològics i edat aproximada de la seva formació. D'aquesta manera, la formació de les terrasses degué començar probablement durant la transgressió marina i l'escalfament del clima ocorregut als inicis de l'Holocè fa uns 9 ka. L'erosió de la zona distal dels ventalls per part de la mar durant les pulsacions transgresives i alguns episodis de refredament del clima que afavorien la formació de fortes precipitacions, així com també una manca de sediment disponible, varen activar els processos d'incisió del canal i de formació dels meandres fins en dues ocasions. A més a més, a partir de l'evolució geomorfològica proposada en aquest estudi, es posa de relleu com durant l'Holocè els ventalls al·luvials costaners a Mallorca es veuen desmantellats progressivament per part de les aigües d'escorrentia i de l'erosió marina.

Referències

Andreucci, S., Panzeri, L., Martini, P., Maspero, F., Martini, M. i Pascucci, V. 2014. Evolution and architecture of a West Mediterranean Upper Pleistocene to Holocene coastal apron-fan system. *Sedimentology*, 61: 333-361.

Bacon, S. N., McDonald, E.V., Caldwell, T.G. i Dalldorf, G.K. 2010. Timing and distribution of alluvial fan sedimentation in response to strengthening of late Holocene ENSO variability in the Sonoran Desert, southwestern Arizona, USA. *Quaternary Research*, 73: 425–438.

Blair, T.C. 1999. Cause of dominace by sheetflood vs. debris-flow processes on two adjoining alluvial fans, Death Valley, California. *Sedimentology*, 46: 1015-1028.

Blair, T.C. i McPherson, J.G. 2009. Processes and forms on alluvial fans. *In*: Parsons, A.J. i Abrahams, A.D. (eds.). *Geomorphology of Desert Environments*. Sringer. Segona edició: 413-467.

Blikra, L.H. i Nemec, W. 1998. Postglacial colluvium in western Norway: depositional processes, facies, and paleoclimatic record. *Sedimentology*, 45: 909-959.

Boulton, S.J. i Stokes, M. 2018. Which DEM is best for analyzing fluvial landscape development in mountain terrains? *Geomorphology*, 310: 168-187.

Bourrouilh, R. 1983. *Estratigrafía, sedimentología y tectónica de la isla de Menorca y del nordeste de Mallorca (Baleares). La terminación nororiental de las cordilleras béticas en el Mediterráneo occidental*. IGME. Madrid. Colección memorias, 99. 672 pp.

Burjachs, F., Pérez-Obiol, R., Roure, J.M. i Julia, R. 1994. Dinàmica de la vegetación durante el Holoceno en la isla de Mallorca. *In*: Ollivier, M.D., Burgaz, M.E., Mateu, I. i Güemes, J. (coords.). *Trabajos de Palinología básica y aplicada: X Simposio de Palinología*. Universitat de València: 199-201.

De Haas, T., Van der Berg, W., Braat, L. i Kleinhans, M. 2016. Autogenic avulsion, channelization and backfilling dynamics of debris-flow fans. *Sedimentology*, 63: 1596-1619.

DiBiase, R.A., Heimsath, A.M. i Whipple, K.X. 2012. Hillslope response to tectonic forcing in threshold landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37: 855–865.

Fornós, J.J., Gelabert, B., Ginés, A., Ginés, J., Tuccimei, P. i Vesica, P.L. 2002. Phreatic overgrowths on speleothems: a useful tool in structural geology in littoral karstic landscapes. The example of Eastern Mallorca (Balearic Islands). *Geodinamica Acta*, 15: 113–125.

Fornós, J.J., Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Gràcia, F., Merino A., Onac, B.P., Tuccimei, P. i Vicens, D. 2012. Upper Pleistocene deposits and karst features in the littoral landscape of Mallorca Island (Western Mediterranean): a field trip. *In*: Ginés, A., Ginés, J., Gómez-Pujol, L., Onac, B.P., Fornós, J.J. (eds.). *Mallorca: A Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 163-219.

Fornós, J.J., Gómez-Pujol, L., Rosselló, V.M., Segura, F., Pardo, J.E. i Van Strydonck, M. 2007. El mantell eòlic de ses Arenes (Ciutadella de Menorca): dades preliminars i primeres datacions. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 50: 227-237.

Frigola, J., Moreno, A., Cacho, I., Canals, M., Sierro F.J., Flores, J.A., Grimalt, J.O., Hoddell, D.A. i Curtis, J.H. 2007. Holocene climate variability in the western Mediterranean region from deepwater sediment record. *Paleoceanography*, 22. PA2209. doi: 10.1029/2006PA001307.

Giménez, J. 2003. Nuevos datos sobre la actividad post-Neógena en la Isla de Mallorca. *Geogaceta*, 33: 91–96.

Gómez-Pujol, L. 1999. Sedimentologia i evolució geomorfològica quaternària del ventall al·luvial des Caló (Betlem, Artà, Mallorca). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 42: 107-124.

Harvey, A.M. 2011. Dryland alluvial fans. *In*: Thomas, D.S.G. (ed.). *Arid zone Geomorphology: Process, Form and Change in Drylands*. John Wiley and Sons. Tercera edició: 333-371.

Harvey, A.M. 2012. The coupling status of alluvial fans and debris cones: a review and synthesis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37: 64-76.

Harvey, A.M., Mather, A.E. i Stokes, M. 2005. Alluvial fans: geomorphology, sedimentology, dynamics-introduction. A review of alluvial-fan research. *In*: Harvey, A.M., Mather, A.E. i Stokes, M. (eds.). *Alluvial fans. Geomorphology, Sedimentology, Dynamics*. Geological Society, London, Special Publications, 251: 1-7.

Harvey, A.M., Silva, P.G., Mather, A.E., Goy, J.L., Stokes, M. i Zazo, C. 1999. The impact of Quaternary sea-level and climatic change on coastal alluvial fans in the Cabo de Gata ranges, southeast Spain. *Geomorphology*, 28: 1-22.

Hilley, G.E. i Arrowsmith, J.R. 2008. Geomorphic response to uplift along the Dragon's Back pressure ridge, Carrizo Plain, California. *Geology*, 36: 367–370.

IEO-IHM. 2001. Zona Económica Exclusiva. Hoja M 11. Mapa Batimétrico.

IUGS. 2018. *1. International Commission on Stratigraphy: New subdivision of the Holocene*. IUGS E-bulletin nº143 – June 2018. http://iugs.org/uploads/E-Bulletin/IUGS-E-bulletin-June-143.pdf

Kaspar, F., Spangehl, T. i Cubasch, U. 2007. Northern Hemisphere winter storm tracks of the Eemian interglacial and the last glacial inception. *Climate of the past*, 3: 181-192.

Leatherman, S. P., Whitman, D. i Zhang, K. 2005. Airborne Laser Terrain Mapping and Light Detection and Ranging. *In*: Schwartz, M.L. (ed.). *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer, Dordrecht: 21-24.

Lowe, J.J. i Walker, M.J.C. 2015. *Reconstructing Quaternary Environments*. Routledge, New York. Tercera edició. 538 pp.

Macklin, M.G., Fuller, I.C., Lewin, J., Maas, G.S., Passmore, D.G., Rose, J., Woodward, JC., Black, S., Hamlin, R.H.B. i Rowan, J.S. 2002. Correlation of fluvial sequences in the Mediterranean basin over the last 200 ka and their relationship to climate change. *Quaternary Science Reviews*, 21: 1633-1641.

MacLeod, E.A. 2017. *Using Lidar to map de the Geology and morphology of alluvial fans, Salton Sea area, California*. Tesina de Màster. Universitat Tecnològica de Michigan. 48 pp.

Martrat, B., Grimalt, J.O., López-Martínez, C., Cacho, I., Sierro, F.J., Flores, J.A., Zahn, R., Canals, M., Curtis, J.H. i Modell, D.A. 2004. Abrupt temperature changes in the Western Mediterranean over the past 250,000 years. *Science*, 306: 1762-1765.

McFadden, L. D., Ritter, J.B. i Wells, S.G. 1989. Use of multiparameter relative-age methods for age estimation and correlation of alluvial-fan surfaces on a desert piedmont, eastern Mojave Desert, California. *Quaternary Research*, 32: 276-290.

Miall, A.D. 1996. *The Geology of Fluvial deposits. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 582 pp.

Moreno, A., Cacho, I., Canals, M., Prins, M.A., Sanchez-Goñi, M.F., Grimalt, J.O. i Weltje, G.L. 2002. Saharan dust transport and high-latitude glacial climatic variability: the Alboran Sea record. *Quaternary Research*, 58: 318-328.

Morton, R.A. 2005. Mapping Shore and Coastal Terrain. *In*: Schwartz, M.L. (ed.). *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer, Dordrecht: 618-623.

Pomar, F. 2016. *Arquitectura i fàcies deposicionals de la interferència entre sedimentació al·luvial, col·luvial i eòlica a les Illes Balears durant el Pleistocè superior: implicacions paleoclimàtiques.* Tesi Doctoral. Universitat de les Illes Balears. 377 pp.

Pomar, F., del Valle, L., Fornós, J.J. i Gómez-Pujol, L. 2018. Late Pleistocene dune-sourced alluvial fans in coastal settings: Sedimentary facies and related processes. *Sedimentary Geology*, 367: 48-68.

Regmi, N.R., McDonald, E.V. i Bacon, S.N. 2014. Mapping Quaternary alluvial fans in the southwestern United States based on multiparameter surface roughness of lidar

topographic data. *Journal of Geophysical Research*, 119: 12-27.

Roering, J.J. 2008. How well can hillslope evolution models explain topography? Simulating soil production and transport using high-resolution topographic data. *Geological Society of America Bulletin,* 120: 1248–1262.

Roering, J.J., Mackey, B.H., Marshall, J.A., Sweeney, K.E., Deligne, N.I., Booth, A.M., Handwerger, A.L. i Cerovski-Darriau, C. 2013. "You are HERE": Connecting the dots with airborne lidar for geomorphic fieldwork. *Geomorphology*, 200: 172-183.

Rovere, A. Khanna, P., Bianchi, C.N., Droxler, A.W., Morri, C. i Naar, D.F. 2018. Submerged reef terraces in the Maldivian Archipielago (Indian Ocean). *Geomorphology*, 317: 218-232.

Shakun, J.D., Clark, P.U., He, F., Marcott, S.A., Mix, A.C., Liu, Z., Otto-Bliesner, B., Schmittner, A. i Bard, E. 2012. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. *Nature*, 484: 49-54.

Siddall, M., Rohling, E.J., Almogi-labin, A., Hemleben, C.H., Melschner, D., Schmelzer, I. i Smeed, D.A. 2003. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle. *Nature*, 423: 853-858.

Silva, P.G., Goy, J.L., Zazo, C., Jiménez, J., Fornós, J.J., Cabrero, A., Bardají, T., Mateos, R.M., González-Hernández, F.M., Hillaire-MarceL, C.L. i Ghaleb, B. 2005. Mallorca island: geomorphological evolution and neotectonics. *In*: Desir, G., Gutiérrez, F. i Gutiérrez, M. (eds.). *Field Trip Guides. Sixth International Conference on Geomorphology.* The International Association of Geomorphologists, Zaragoza, Spain: 433–472.

Smith, D.E., Harrison, S., Firth, C.R. i Jordan, J.T. 2011. The Early Holocene sea level rise. *Quaternary Science Reviews*, 30: 1846-1860.

Thompson, W. 2017. *Late Quaternary Fluvial System Response to climatic change over the past 200 ka on Mallorca, Illes Balears*. Tesi Doctoral. Universitat de Derby. 303 pp.

Törnqvist, T.E. i Hijma, M.P. 2012. Links between early Holocene ice-sheet decay, sea-level rise and abrupt climate change. *Nature Geoscience*, 5: 601-606.

Törnqvist, T.E., Bick, S.J., González, J.L., van der Boorg, K. i de Jong, A.F.M. 2004. Tracking the sea-level signature of the 8.2 ka cooling event: New constraints from the Mississippi Delta. *Geophysical Research Letters*, 31. L23309. doi: 10.1029/2004GL02429.

Vacchi, M., Marriner, N., Morhange, C., Spada, G., Fontana, A. i Rovere, A. 2016. Multiproxy assessment of Holocene relative sea-level changes in the western Mediterranean: Sea-level variability and improvements in the definition of isostatic signal. *Earth-Science Reviews*, 155: 172-197.

Ventra, D. i Nichols, G.J. 2014. Autogenic dynamics of alluvial fans in endorheic basins: Outcrop examples and stratigraphic significance. *Sedimentology*, 61: 767-791.

Wells, S.G., McFadden, L.D. i Dohrenwend, J.C. 1987. Influence of late Quaternary climatic changes on geomorphic and pedogenic processes on a desert piedmont, Eastern Mojave Desert, California. *Quaternary Research*, 27: 130–146.

Yll, E-I, Pérez-Obiol, R., Pantaleón-Cano, J. i Roure, J.M. 1997. Palynological Evidence for Climatic Change and Human Activity during the Holocene on Minorca (Balearic Islands). *Quaternary Research*, 48: 339-347.